



Joni Rossinen

# Kaupunkiauton etutuennan ja ohjauksen suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Auto- ja kuljetustekniikka  
Insinöörityö  
25.5.2012

Tekijä(t) Otsikko	Joni Rossinen Kaupunkiauton etutuen ja ohjauksen suunnittelu
Sivumäärä Aika	30 sivua + 2 liitettä 25.5.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Tuntiopettaja Pasi Oikarinen Projekti-insinööri Harri Santamala
<p>Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin etutuenta ja ohjaus Metropolia Ammattikorkeakoulun autoprojektissa tehtävään kaupunkiautoon. Työn tavoitteena oli suunnitella kaupunkiolosuhteisiin soveltuva etutuenta ja ohjaus. Tuennan osalta tavoitteena oli saavuttaa mahdollisimman pienet muutokset pyöräkulmissa joustotilanteissa ja ohjauksen osalta tavoitteena oli saavuttaa Ackermann-ohjaus ja pieni kääntösäde.</p> <p>Työssä käydään aluksi läpi tuentaan ja ohjaukseen liittyviä peruskäsitteitä, jotka ovat tarpeellisia tietää suunnittelutyötä tehtäessä. Käsitteiden jälkeen tarkastellaan lähtöarvoja ja linjauksia, joita tarvitaan suunnittelutyötä tehtäessä. Lähtöarvojen ja linjauksien jälkeen tutkitaan autoon tulevien iskunvaimentimien ja jousien ominaisuuksia niihin liittyvien laskujen avulla. Lopussa kuvataan tehty suunnittelutyö kolmessa vaiheessa.</p> <p>Suunnittelun alussa asetetut tavoitteet saavutettiin simuloinneista saatujen tulosten perusteella hyvin. Yhdessä tarkastelluista tuennan arvoista oli pieni poikkeama asetettuun tavoitteeseen nähden. Käytännön testejä ei päästy tekemään tämän opinnäytetyön aikana, mutta niitä tullaan tekemään auton ollessa siinä vaiheessa, että sillä voidaan ajaa. Etutuen ja ohjauksen suunnittelua voidaan jatkaa tämän opinnäytetyön pohjalta.</p>	
Avainsanat	kaupunkiauto, etutuenta, ohjaus

Author(s) Title	Joni Rossinen Designing the Front Suspension and Steering for a City Car
Number of Pages Date	30 pages + 2 appendices 25 May 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design
Instructor(s)	Pasi Oikarinen, Lecturer Harri Santamala, Project Engineer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to design front suspension and steering for the new city car project of the Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. The aim in designing the suspension was to achieve as stable tire behavior as possible in bump and rebound. The aim in designing the steering was to achieve Ackermann steering geometry and small turning radius.</p> <p>The thesis starts by getting familiar with the basic concepts of suspension and steering which is essential information needed in the design process. After that output values and projections are analyzed. Next shock absorbers and springs with related calculations are described. Finally, the design work is described in three different stages.</p> <p>The results from the simulation tests seem to indicate that the aims set at the beginning of the project were mainly achieved. There is only a slight deviation in one of the parameters. Practical tests could not be made during this thesis, but they will be made when the car can be driven. The design of front suspension and steering can be continued based on this thesis.</p>	
Keywords	city car, front suspension, steering

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Käsitteet	2
2.1	Jousitus	2
2.2	Ohjaus	5
3	Etutuennan ja ohjauksen suunnittelu	7
3.1	Lähtötilanne	7
3.2	Tuentavaihtoehdot ja valittu tuenta	7
3.3	Suunnittelussa käytetyt ohjelmat	8
3.4	Jousituksen osat	10
3.4.1	Iskunvaimentimet	11
3.4.2	Ilmajouset	14
3.5	Suunnittelu	17
3.5.1	Ensimmäinen vaihe	17
3.5.2	Toinen vaihe	19
3.5.3	Kolmas vaihe	23
4	Yhteenveto	28
	Lähteet	30
	Liitteet	
	Liite 1. Iskunvaimenninmittausten tulokset	
	Liite 2. Nivelpisteiden sijainnit	

## 1 Johdanto

Koko autoteollisuus siirtyy jatkuvasti ekologisempaan suuntaan ja ajoneuvojen päästöjä sekä kulutusta yritetään pienentää jatkuvalla tahdilla. Tämän seurauksena Metropolia Ammattikorkeakoulu haluaa myös osallistua ekologisen auton suunnitteluun ja on päättänyt tehdä pääosin opiskelijavoimin nykyaikaisen ja ekologisen kaupunkiauton. Metropolian aiempia autoprojekteja ovat olleet mm. Electric RaceAbout -sähköurheiluauto ja CityCab-kaupunkitaksi.

Kaupunkiautoprojekti aloitettiin yhden vuosikurssiryhmän kurssipohjaisena projektina syksyllä 2010. Siitä lähtien projektia on viety jatkuvasti eteenpäin ja auton julkistamistilaisuus Geneven autonäyttelyssä 2014 alkaa lähestyä. Suunnittelussa on alusta asti pyritty ottamaan huomioon nykyaikaisen kaupunkiauton ominaisuuksia ja sen mahdollisten käyttäjien asettamat tavoitteet. Kantava teema koko suunnittelun ajan on ollut ekologisuus: jokaisen osan valmistus ja lopullinen kokoonpano pyritään tekemään mahdollisimman pienen hiilijalanjäljen avulla.

Auton voimanlähteenä toimii Volkswagen Polon 1,2-litrainen TDI -dieselmoottori, jonka polttoaineena tullaan käyttämään uutta biodieselä. Moottori optimoidaan biodieselille ja sen avulla pyritään saamaan päästöt ja kulutus alhaisempiin lukemiin normaaliin dieseliin verrattuna kuitenkin niin, että moottori säilyttää saman suorituskyvyn. Auton itsekantava kori valmistetaan osittain luonnonkuiduista ja osittain prepreg-tekniikalla valmistetusta hiilikuidusta, joka mahdollistaa korin alhaisen painon, mutta silti jäykän rakenteen. Mahdollisimman suuri osa auton paneeleista ja sisätilan osista pyritään valmistamaan ekologisista materiaaleista. Pienissä tiloissa kääntymisen ja taskuparkkeeraamisen avuksi auton alle taka-akselin taakse tulee kaksi trukin rengasta poikittain. Niiden avulla auton perä saadaan nostettua ilmaan ja sitä voidaan liikuttaa sivuille. Järjestelmä toimii mönkijän vinssin ja paineilmajärjestelmän avulla.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään kaupunkiauton etutuennan ja ohjauksen suunnitteluun. Työn tavoitteena on suunnitella etutuenta kaupunkiautoon ja saada pyörillä tapahtuvat muutokset mahdollisimman pieniksi erilaisissa ajotilanteissa, ja erityisesti ohjauksen suunnittelussa keskitytään ajoon kaupunkiolosuhteissa. Ajaminen kaupunkiolosuhteissa vaatii autolta ketteryyttä, ja auton pitää pystyä kääntymään pienessäkin ti-

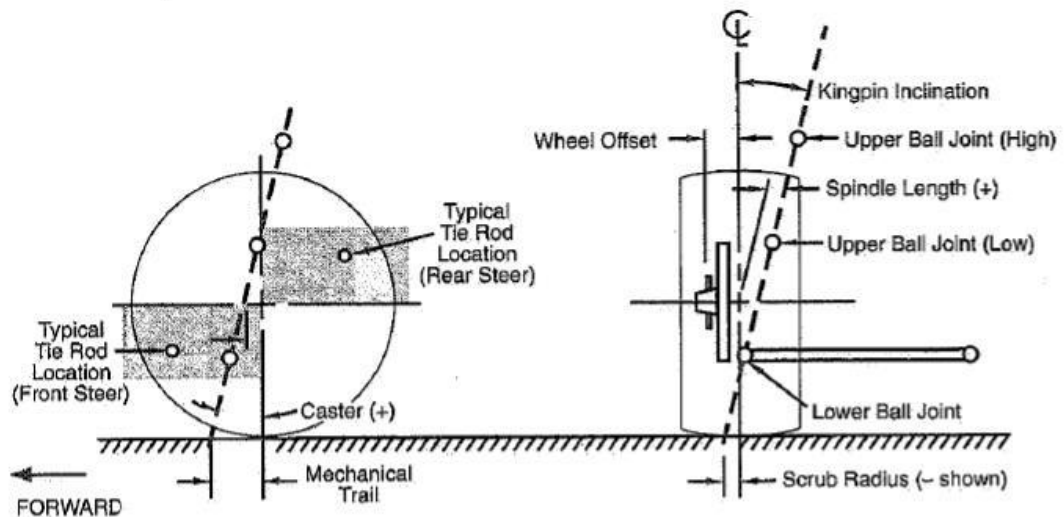
lassa. Lisäksi työ toimii etutuennan ja ohjauksen ohjeena projektissa jatkaville opiskelijoille. Työstä käyvät ilmi perustelut tehdyille ratkaisuille ja työn tuloksia voidaan myös käyttää mahdollisen etutuennan ja ohjauksen jatkokehityksen pohjana.

## **2 Käsitteet**

### **2.1 Jousitus**

Pyöräntuuntaa suunniteltaessa on otettava huomioon useita eri pyörän asentokulmia, joihin tuennan osien sijoitus ja asennot vaikuttavat. Pyörältä löytyy kuvitteellinen akseli, kääntöakseli, jonka ympäri pyörä kääntyy. Kääntöakseli kulkee iskunvaimentimen yläpään kiinnityskohdan nivelpisteestä alapallonivelen nivelpisteeseen. Kääntöakselin asentoa voidaan tarkastella caster- sekä SAI-kulman avulla.

Caster-kulma kertoo kääntöakselin takakallistuman. Caster-kulma on positiivinen, kun kääntöakseli on kallistunut taaksepäin, eli iskunvaimentimen yläpään kiinnityksen nivelpiste on taaempana kuin alapallonivelen nivelpiste. Caster vaikuttaa auton koriin ja pyörän asentokulmiin eri ajotilanteissa. Kun pyöriä käännetään, auton kori nousee caster-kulman ja aurauksen yhteisvaikutuksesta. Kun kuljettaja päästää ohjauspyörästä irti, auton paino auttaa palauttamaan renkaat neutraaliin asentoon. Positiivinen caster aiheuttaa negatiivista camberia kääntötilanteessa ulkopyörällä. Tavallisesti caster-kulma etuvetoisissa etumoottorisissa autoissa on 1–5 astetta [1, s. 25]. Kuviossa 1 on esitetty caster- ja SAI-kulma, kääntöakseli, a-mitta ja etujättö.

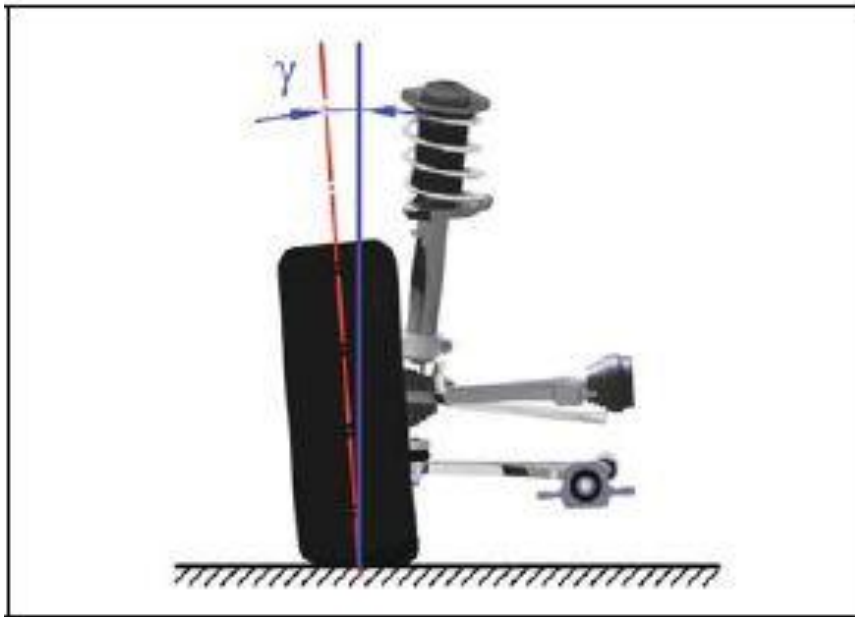


Kuvio 1. Caster- ja SAI-kulma, kääntöakseli, a-mitta ja etujättö.

SAI-kulma (kingpin inclination) kertoo kääntöakselin sivukallistuman. SAI-kulma on positiivinen kääntöakselin yläpään ollessa lähempänä auton keskilinjaa kuin alapään. A-mitta (scrub radius) ja etujättö (mechanical trail) määräytyvät kääntöakselin ja renkaan tiehen muodostaman kosketuspinnan keskipisteen mukaan. A-mitta kertoo kääntöakselin ja renkaan tiehen muodostaman kosketuspinnan keskipisteen etäisyyden sivusuunnassa. Kääntöakselin tien leikkauspisteen ollessa pyörän keskitasoon verrattuna lähempänä auton keskiosaa, puhutaan positiivisesta a-mitasta. A-mitta on nykyisissä henkilöautoissa -20–80 millimetriä, ja se voi muuttua renkaan koon muuttuessa [1, s. 25]. Jos halutaan poistaa ABS-järjestelmän aiheuttama ohjauspyörän värinä, a-mitta voidaan asettaa lähelle nollaa. Etujättö kertoo kääntöakselin ja renkaan tiehen muodostaman kosketuspinnan keskipisteen etäisyyden pituussuunnassa. Etujättö on negatiivinen, kun kääntöakselin tien leikkauspiste on renkaan kosketuspinnan takapuolella.

Pyörällä on myös asentokulmia, jotka eivät kuvaa kääntöakselin asentoa. Näitä asentokulmia kuvaavat camber-kulma ja auraus. Kuviossa 2 on esitetty camber-kulman periaate. Camber-kulma on renkaan sivukallistuma renkaan keskilinjaan nähden katsottaessa rengasta joko auton keulasta tai perästä. Kuvion 2 mukaisessa tilanteessa, jossa renkaan alareuna on lähempänä auton keskilinjaa kuin yläreuna, puhutaan positiivisesta camber-kulmasta. Kaarreaajossa negatiivinen camber ulommalla pyörällä auttaa sivuttaisvoimien siirtämisessä ja tämän seurauksena autolla voidaan ajaa suuremmalla nopeudella kaarteeseen menettämättä pitoa. Suuret camber-kulmat aiheuttavat pyöri-

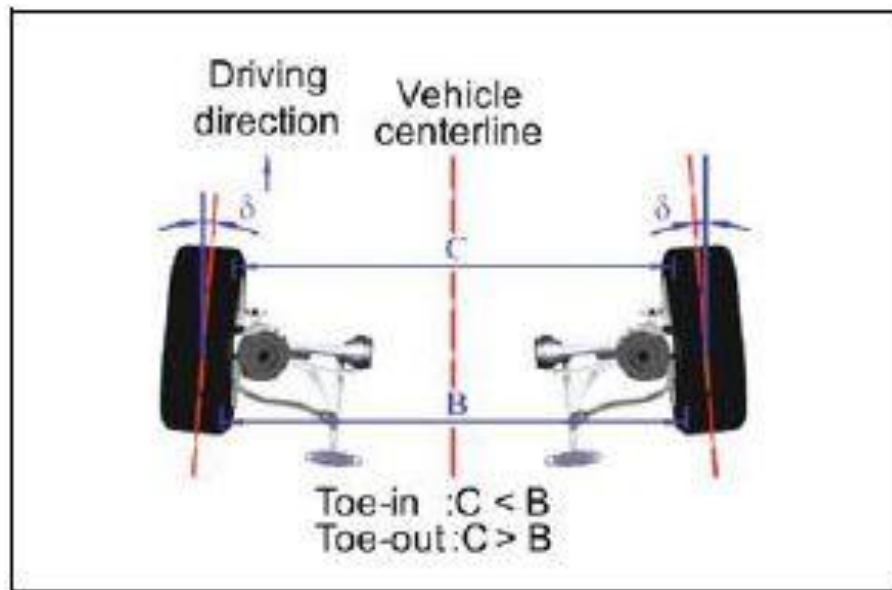
en ylimääräistä kulumista normaaleissa ajotilanteissa. Tyypillinen arvo camber-kulmalle on staattisessa tilanteessa  $-2^{\circ}$ – $2^{\circ}$  [1, s. 22].



Kuvio 2. Camber-kulman periaate.

Kuviossa 3 on havainnollistettu aurauskulma. Tarkasteltaessa autoa ylhäältä päin voidaan nähdä pyörien auraus. Auraus kuvaa ajoneuvon pitkittäisakselin ja pyörien välistä kulmaa. Auton pyörien etureunojen ollessa lähempänä kuin takareunat, puhutaan aurauksesta. Takareunojen ollessa lähempänä kuin etureunojen, puhutaan harituksesta. Aurauskulman tyypillinen arvo etuakselilla etuvetoisella autolla staattisessa tilanteessa on  $-30'$ – $20'$  [1, s. 22]. Auraus aiheuttaa pyörien ylimääräistä kulumista suoraan ajettaessa.





Kuvio 3. Auruskulman periaate.

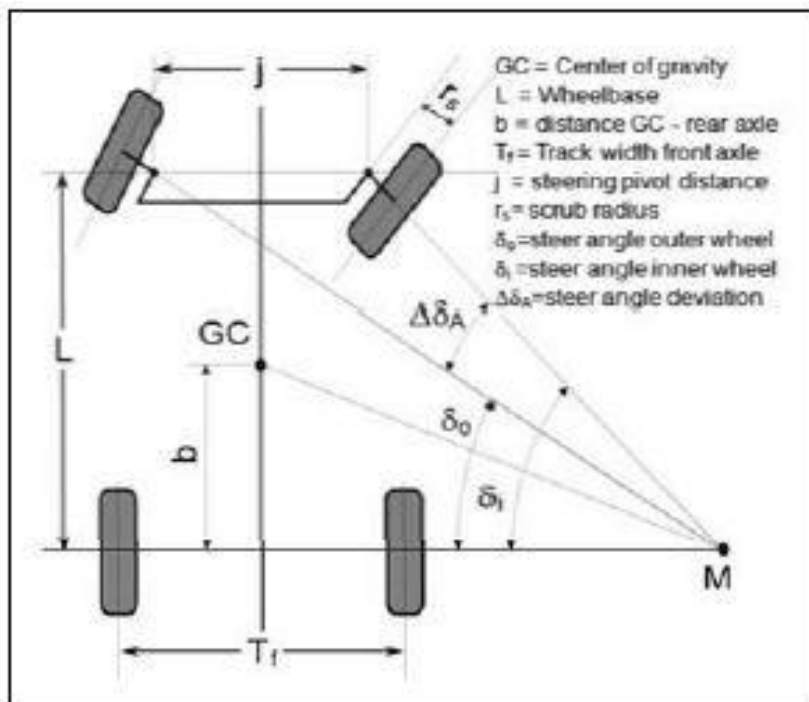
Pyörän asentokulmien lisäksi auton jousitukseen vaikuttaa muitakin tekijöitä, jotka ovat auton painopiste, painojakauma, kallistuskeskiö ja kallistusakseli. Painopiste määräytyy komponenttien sijoittelun perusteella. Painopiste on piste, johon kappaleen paino on keskittynyt. Autossa on kaksi kallistuskeskiötä. Toinen sijaitsee etuakselilla ja toinen taka-akselilla. Kallistuskeskiön sijaintiin vaikuttaa tuennan osien sijoittelu. Kallistuskeskiöiden välillä on kallistusakseli. Painopiste ja kallistuskeskiö määräävät paljon auton ajo-ominaisuuksia kaarreaajossa. Painopiste kiertyy kallistuskeskiön ympäri ja tämän vaikutuksesta auton kori kallistuu. Kallistumissuunta riippuu painopisteen sijainnista. Painopiste yleensä sijaitsee auton pituussuuntaisella keskilinjalla. Painojakauma kertoo auton painon jakautumisesta etu- ja taka-akselin välillä. Painojakauma ilmoitetaan suhdelukuna, esimerkiksi 55:45, joka tarkoittaa, että 55 prosenttia auton painosta on etuakselilla ja 45 prosenttia painosta on taka-akselilla.

## 2.2 Ohjaus

Kuten pyöräntuennan suunnittelussa myös ohjauksen suunnittelussa on otettava huomioon useita tekijöitä, jotka vaikuttavat auton käyttäytymiseen ja ajo-ominaisuuksiin pyöriä käännettäessä. Ensin on hyvä tarkastella pyörän kääntökulmaa ja sortokulmaa. Pyörän kääntökulma kertoo sen, kuinka paljon pyörää on käännetty verrattuna tilanteeseen, jossa ohjauspyörä on suorassa. Tietyllä pyörän kääntökulmalla saavutetaan

haluttu kääntyvyys. Mitä enemmän pyörät kääntyvät, sitä pienempi on kääntösäde. Sortokulma kertoo renkaan todellisen kulkusuunnan ja renkaan keskilinjan välisten kulmien eron. Sortokulma vaikuttaa auton kääntyvyyteen niin, ettei auto välttämättä käännä niin pienellä kääntösäteellä kuin halutaan, koska renkaat pyrkivät liukumaan ja näin ollen kasvattavat kääntösädettä.

Yksi tärkeimmistä ohjauksen suunnittelua määrittelevistä tekijöistä on Ackermann-ohjaus. Kuviossa 4 on esitetty Ackermann-ohjauksen toimintaperiaate. Ackermann-ohjauksen periaatteena on saavuttaa sellainen ohjausgeometria, että autolla kääntyessä renkaille ei synny sortokulmia eikä sivuttaisvoimia. Tämä vaatii eri kääntökulman ulko- ja sisärenkaalle. Kuviossa 4 on nähtävissä, milloin nämä ehdot toteutuvat. Eturenkailta lähtevät kuvitteelliset viivat leikkaavat toisensa kuvitellulla taka-akselin läpi kulkevalla viivalla. Sisäpuolen renkaan kääntökulman tulee olla suurempi kuin ulkopuolen renkaan, koska sisärenkaan kulkema matka on pienempi kuin ulkorenkaan.



Kuvio 4. Ackermann-ohjauksen toimintaperiaate.

Täydellinen Ackermann-ohjaus eli ohjaus, joka kaikilla renkaiden kääntökulmilla saavuttaa aiemmin kuvatun halutun tilanteen, vaatii monimutkaisen ohjausakseliston. Jotta

täydellinen ohjaus saavutettaisiin kaikilla renkaiden kääntökulmilla, raidetankojen pituuden tulisi muuttua kääntökulmasta riippuen [2, s. 149].

### **3 Etutuennan ja ohjauksen suunnittelu**

#### **3.1 Lähtötilanne**

Etutuennan suunnittelu aloitettiin miettimällä kaupunkiautolle haluttuja ominaisuuksia. Aluksi päätettiin auton teknisiä mittoja. Auton akseliväliksi valittiin 2470 mm ja raideväliksi valittiin 1550 mm. Akseliväli on sama kuin kanta-autossa, koska sen muuttamiselle ei nähty tarvetta auton kokonaispituuden pysyessä lähellä kanta-auton pituutta. Raideväli kasvoi kanta-auton raidevälistä, koska auton leveys tulee olemaan suurempi kuin kanta-autossa. Jos raideväli jätettäisiin samaksi kuin kanta-autossa, renkaat eivät mahdusi kääntymään kunnolla ja renkaat olisivat paljon lähempänä auton keskilinjaa kuin korin ulkoreuna. Suunnittelun alkuvaiheessa tehtiin myös kartoitus saman kokoluokan autojen käyttämistä tuenta- ja ohjaustyypeistä. Kaikissa saman kokoluokan autoissa ohjaustyyppinä käytettiin hammastanko-ohjausta ja se päätettiin valita myös tähän autoon. Hammastanko-ohjauksen valintaa puolsi myös se seikka, että tämä ohjaustyyppi on käytössä kanta-autossa.

#### **3.2 Tuentavaihtoehdot ja valittu tuenta**

Tuentavaihtoehtoja etuakselille oli kaksi, McPherson-tuenta tai päällekkäiset kolmiotukivarret. McPherson-tuenta on nykyään yleisin henkilöautoissa käytetty tuentatyyppi etuakselilla. Sen tilantarve on pieni ja suunnitteluvaiheessa on mahdollista vaikuttaa ajo-ominaisuuksiin nivelpisteiden paikkoja ja osia muuttamalla. Tuenta rakentuu iskunvaimentimesta, joka on kiinni olka-akselissa ja jousesta, joka on sijoitettu iskunvaimentimen ympärille. Lisäksi tuentaan kuuluu tukivarsi, joka tässä tapauksessa on kolmion muotoinen ja alapallonivel, joka yhdistää tukivarren ja olka-akselin. McPherson-tuentaan kuuluu yleensä myös kallistuksenvakaaja, mutta sen suunnittelu ei kuulu tähän opinnäytetyöhön, vaan se suunnitellaan myöhemmin.

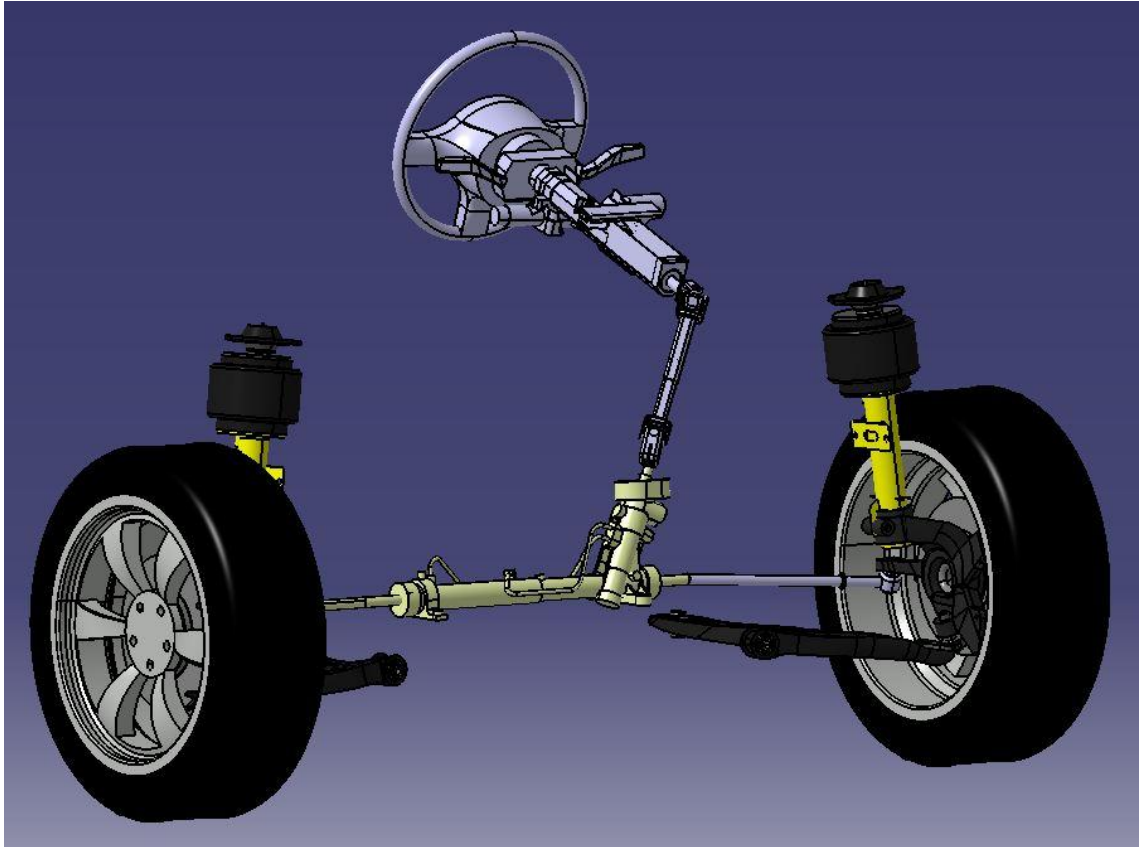
Päällekkäiset kolmiotukivarret rakentuvat kahdesta päällekkäisestä kolmiotukivarresta, jousesta, iskunvaimentimesta ja olka-akselista. Iskunvaimennin ja jousi kiinnitetään

alapäästään jompaankumpaan tukivarteen tai olka-akseliin. Kuten McPherson-tuennassakin, iskunvaimentimen yläpää kiinnitetään auton koriin. Tukivarret kiinnitetään ulommalta puolelta olka-akseliin ja sisemmältä puolelta auton koriin. Päällekkäiset kolmiotukivarret mahdollistavat kattavamman alustageometrian suunnittelun, mutta käyttöä tuotantoautoissa rajoittaa nivelien ja osien suurempi lukumäärä kuin McPherson-tuennassa. Päällekkäisiä kolmiotukivarsia käytetään isojen kokoluokkien autoissa ja urheiluautoissa.

Vaihtoehtojen vertailun jälkeen päädyttiin valitsemaan McPherson-tuenta. Tuennan suunnittelemisen on yksinkertaisempaa ja kiireellisen aikataulun vuoksi parempi vaihtoehto. Tuenta on kuitenkin mahdollista sovittaa kaupunkiolosuhteissa tapahtuvaan ajoon ja se on yleisesti tämän kokoluokan autoissa käytössä. Lisäksi valintaa puolsi kanta-auton tuentatyyppi. Kanta-autosta saatua tuentaa muutettiin vaihtamalla teräsjousi ilmajouseen sen tarjoamien ajokorkeussäätöjen ja ominaisuuksien vuoksi. Kaupunkiajossa auton ajokorkeutta voidaan pitää korkealla paremman näkyvyyden vuoksi ja maantieajossa ajokorkeus voidaan laskea, jotta kulutus saadaan pienentymään pienemmän ilmanvastuksen avulla. Matalampi ajokorkeus myös vakauttaa autoa. Kanta-autosta otettiin lisäksi alatukivarret ja olka-akselit, joita tullaan käyttämään tulevassa autossa.

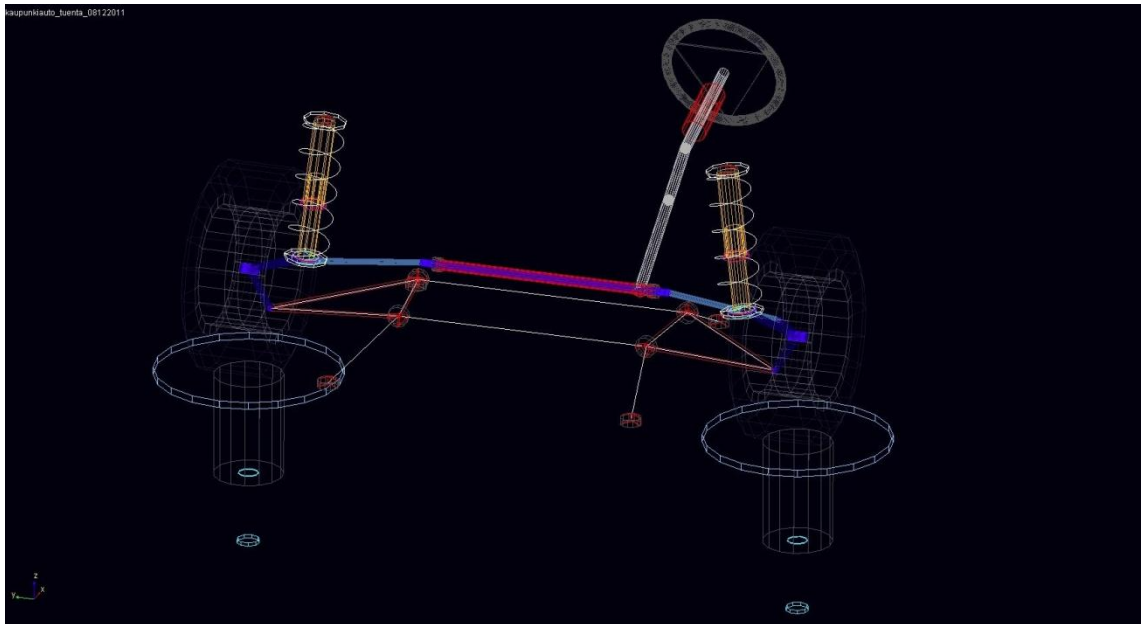
### 3.3 Suunnittelussa käytetyt ohjelmat

Suunnittelu aloitettiin digitoimalla ja mallintamalla kaikki tuentaan ja ohjaukseen liittyvät osat. Digitointiin käytettiin mittavartta, jonka päässä olevalla mittakärjellä voidaan osoittaa kappaleen pinnasta eri kohtia ja ne saadaan siirrettyä pisteinä, ympyröinä tai viivoina CadKey19s-ohjelmaan. Mittavarren avulla saatiin hieman käsitystä siitä missä nivelpisteet ja osat sijaitsevat kanta-autossa. CadKey19s-ohjelmaan kerätyt tiedot siirrettiin IGES-tiedostomuodossa Catia V5R20 -mallinnusohjelmaan. Ohjelmalla luotiin tuoduista pisteistä tuennan ja ohjauksen komponentit ja sen jälkeen ne kasattiin tuenta- ja ohjauskokoonpanoksi, joka on esitetty kuviossa 5. Tämän kokoonpanon avulla pystyttiin näkemään sen vaatima tilantarve ja osien sijoittelu. Kuviosta 5 puuttuu apurunko, johon tukivarret ja hammastanko tulevat kiinni, koska sen suunnittelu ja mallintaminen oli vielä kesken.



Kuvio 5. Tuenta- ja ohjauskokoonpano mallinnettuna Catia V5R20 -suunnitteluohjelmalla.

Kun osat oli saatu sijoiteltua suunnilleen oikeille paikoilleen, siirryttiin mallintamaan aluksi tuentaa ja myöhemmin ohjausta Adams/AView-monikappaledynamiikka-ohjelmalla. Tuenta ja ohjaus luotiin ottamalla Catiasta nivelpisteiden sijainnit xyz-koordinaatistossa ja siirtämällä ne Adamsiin. Sitten kun tuenta ja ohjaus oli saatu mallinnettua, päästiin niille luomaan liikkeitä ja tarkastelemaan pyörien asento- ja ohjauskulmissa tapahtuvia muutoksia. Adams/AView vaatii käyttäjältä enemmän työtä auton erilaisissa simuloinneissa kuin Adams/Car, jota siirryttiin käyttämään sen tarjoamien kattavampien auton simulointimahdollisuuksien takia. Adams/Car ei vaatinut käyttäjältä muuta kuin nivelpisteiden sijainnit, minkä jälkeen ohjelma itse loi tuennan ja ohjauksen osat. Lisäksi simulointien tekeminen oli huomattavasti helpompaa. Kuviossa 6 on nähtävissä Adams/Car-ohjelmalla mallinnettu etutuenta ja ohjaus. Simulointien tekeminen oli huomattavasti helpompaa ja ohjelmalla oli mahdollista tehdä kattavampia simulointeja. Lisäksi simulointien tuloksien analysointi oli tehty paremmin.



Kuvio 6. Etutuenta ja ohjaus mallinnettuina Adams/Car-ohjelmalla.

Adams/Car mahdollistaa kokonaisten autojen ja autojen osakokonaisuuksien prototyyppien virtuaalisen rakentamisen ja näin ollen mahdollistaa suunnitellun prototyypin nopeamman testauksen. Ohjelmaa käytettäessä on mahdollista tarkastaa prototyypin toiminta ilman sen varsinaista rakentamista, ja sen avulla voidaan säästää aikaa ja kustannuksia.

Etutuennan kannalta olennaisia tekijöitä ja niiden muuttumista kokoonpanon muuttuessa kuten a-mittaa, etujättöä, caster-kulmaa ja SAI-kulmaa oli helppo seurata Win-Geo3-ohjelman avulla, johon laitettiin nivelpisteiden sijainnit, ja ohjelma näytti arvot. Ohjelmalla on mahdollista tehdä myös yksinkertaisia simulointeja, mutta ominaisuuksien ollessa rajatut päädyttiin käyttämään Adams/AView'tä ja Adams/Caria.

### 3.4 Jousituksen osat

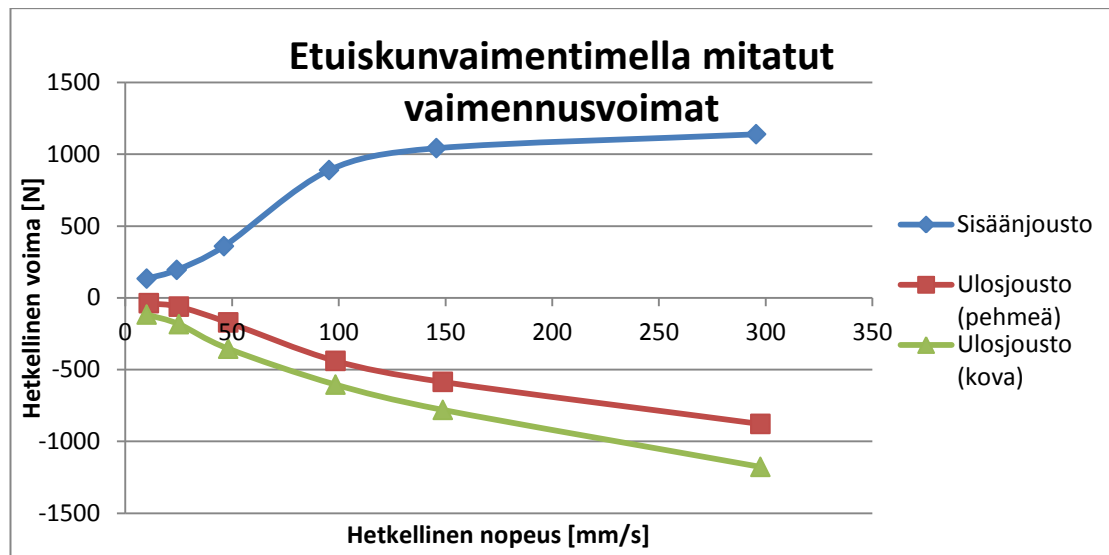
Auton jousitukseen kuuluvat jouset, iskunvaimentimet ja pyöräntuennan osat. Niiden tehtävänä on tehdä auton ajettavuudesta mahdollisimman mukavaa ja ne mahdollistavat auton hallinnan erilaisissa ajotilanteissa. Kanta-autosta otettiin alatukivarret ja olka-akselit. Jouset ja iskunvaimentimet tilattiin erikseen, koska autoon haluttiin ilmajousitus.

### 3.4.1 Iskunvaimentimet

Iskunvaimentimien tehtävä on vaimentaa pystysuuntaisia liikkeitä, jotka syntyvät kun autolla ajetaan erilaisten tiessä olevien epätasaisuuksien yli. Jos iskunvaimentimia ei olisi, auton ajaminen ja hallinta olisi erittäin hankalaa, koska rengaskosketus tiehen katoaisi ja tämän seurauksena pito katoaisi. Nesteiskunvaimentimien toiminta perustuu nesteen liikkumisen vaikuttamiseen ja energian olomuodon muuttamiseen. Iskunvaimentimen sisällä on sylinteri, jonka sisällä liikkuu mäntä. Männän molemmin puolin on nestettä. Kun mäntä liikkuu, neste kulkee ahtaiden kanavien läpi puolelta toiselle ja männän liike hidastuu. Jousituksen liikkeen kineettinen energia muutetaan lämpöenergiaksi, joka voidaan häivyttää hydraulisen nesteen kautta. Vaimennustehoa saadaan muutettua muuttamalla kanavien kokoa tai lukumäärää sekä muuttamalla männän jousien tai jousiprikkojen jäykkyyttä.

Iskunvaimentimien valinnassa on syytä kiinnittää huomiota erityisesti kahteen asiaan, jousittamattomaan massaan ja renkaan kokoon sekä jäykkyyteen [3, s. 829]. Projektin auton iskunvaimentimien valinnassa huomio kiinnitettiin pääosin siihen, että vaimentimet oli tarkoitettu Volkswagen Polo -kokoluokan autolle ja tähän samaan kokoluokkaan pyritään pääsemään lopullisella autolla.

Auton toinen etuiskunvaimennin käytettiin testipenkissä. Molempia etuiskunvaimentimia ei testattu, koska niiden oletettiin olevan samanlaiset. Etuiskunvaimentimissa on ulosjouston jäykkyydelle säätö. Tällä säädöllä voidaan vaikuttaa siihen, miten paljon voimaa tarvitaan, että töyssyn aiheuttaman sisäänjouston jälkeen rengas palautuu lähemmäs ajoasentoa. Kuviosta 7 voi nähdä etuiskunvaimentimen sisään- ja ulosjouston testauksen tuottaman kuvaajan, jossa vaaka-akselilla on hetkellinen nopeus millimetreinä sekunnissa ja pystyakselilla hetkellinen voima newtoneina. Kuvaajasta on nähtävissä ulosjouston jäykkyyden säädön aiheuttama vaikutus. Kuvaajaan saatiin arvot alkuperäisistä iskunvaimenninmittausten tuloksista (liite 1).



Kuvio 7. Etuiskunvaimentimella testipenkissä mitatut vaimennusvoimat ulos- ja sisäänjoustossa.

Etuiskunvaimentimen vaimennusvoiman kuvaajasta voidaan nähdä, että ulos- ja sisäänjouston vaimennusvoimien suhde on lähes 1:1 sekä pehmeällä että kovalla säädöllä. Tämä on epätyypillistä katuliikenteeseen tarkoitetulle henkilöautolle. Yleensä suhde on 1:2 tai 1:3, koska sisäänjoustossa jousi ottaa vastaan suurimman osan voimasta ja esteen ylityksessä nopeus voi olla todella suuri, jolloin pienempi voima sisäänjoustossa estää rajut iskut pyöräntuennan komponenteille.

Iskunvaimentimien ominaisuuksia voidaan tutkia vaimennussuhteen avulla. Vaimennussuhteen ollessa 0 ei ole vaimennusta ollenkaan, suhteen ollessa 1 puhutaan kriittisestä vaimennuksesta, jossa massa palaa tasapainoasemaansa ilman jatkoheilahteluja ja suhteen ollessa enemmän kuin 1 vaimennus on erittäin löysä, jolloin massa ei teoreettisesti palaa koskaan tasapainoon. Vaimennussuhteen ollessa 0,25–0,35 ollaan alueella, jossa vaimennus on mukavuusominaisuuksiltaan parhaimmillaan, ja suhteen ollessa alueella 0,8–0,9 vaimennus on hallintaominaisuuksiltaan parhaimmillaan [4, s. 133].

Vaimennussuhteen laskemiseen tarvitaan tietää kriittinen vaimennus pyörällä tai vaimentimella. Tässä tapauksessa vaimennussuhteen laskemiseen käytetään iskunvaimenninmittauksista saatuja arvoja, joten on luonnollista käyttää kriittistä vaimennusta vaimentimella.



Kriittinen vaimennus pyörällä saadaan laskettua kaavalla 1.

$$k = 2\sqrt{cm} \quad (1)$$

$c$  on joustojäykkyys renkaalla [N/m]

$m$  on jousitettu kulmapaino [kg]

Kriittiseksi vaimennukseksi pyörällä saadaan 9938 Ns/m.

Kriittinen vaimennus vaimentimella saadaan jakamalla kriittinen vaimennus pyörällä liikesuhteen neliöllä. Kriittiseksi vaimennukseksi vaimentimella saadaan 11615 Ns/m.

Vaimennussuhde saadaan laskettua kaavalla 2.

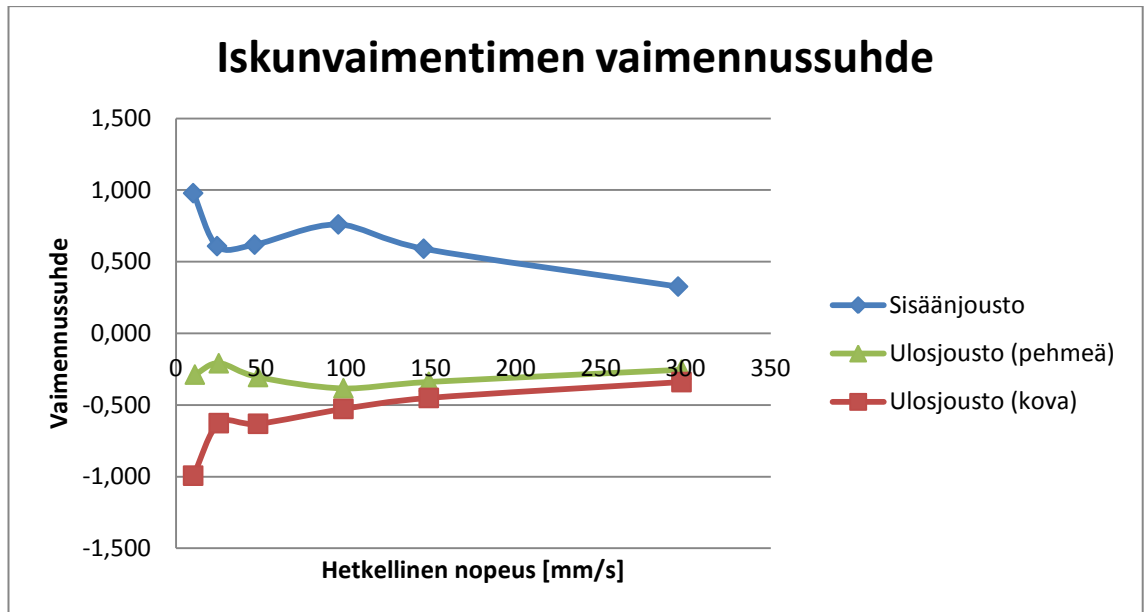
$$D = \frac{F}{kv} \quad (2)$$

$F$  on vaimenninvoima iskunvaimentimella [N]

$k$  on kriittinen vaimennus vaimentimella [Ns/m]

$v$  on hetkellinen nopeus [m/s]

Vaimennussuhde lasketaan erikseen jokaiselle pisteelle, jotka saatiin iskunvaimenninmittauksesta. Vaimennussuhteen jokaisessa pisteessä sekä sisään- että ulosjoustolla voi nähdä kuviosta 8.



Kuvio 8. Iskunvaimentimen vaimennussuhde sisään- ja ulosjoustossa.

Vaimennussuhteen kuvaajista voidaan nähdä, että vaimennus on jäykkä ja vaimentimet ovat sisäänjoustossa ja ulosjoustossa kovalla asetuksella hallinta- ja mukavuusominaisuuksien välillä. Pehmeällä ulosjouston asetuksella ollaan mukavuusominaisuuksien alueella. Iskunvaimenninlaskuissa arvot painoille ovat arvioita, koska tarkkoja arvoja ei tiedetty projektin tässä vaiheessa.

### 3.4.2 Ilmajouset

Tähän autoon valittiin ilmajouset perinteisemmin käytettyjen teräsousien tilalle. Ilmajousituksessa teräsjousi on korvattu kudosvahvistetulla jousipalkeella. Ilmajousitus valittiin sen tuomien korkeudensäätömahdollisuuksien takia. Kaupunkiolosuhteissa jousitus pidetään yläasennossa, jolloin näkyvyys on parempi ja ovet voi avata huoletta lähellä katukiveystä ilman pelkoa siitä, että ovet osuvat kanttikiveen ja vaurioituvat. Maantieolosuhteissa jousitus voidaan pitää ala-asennossa ja tämän ansiosta saadaan kulutusta laskettua ja auto on myös vakaampi ajaa. Ilmajousituksen hyviä puolia on jo aiemmin mainittu korkeudensäätömahdollisuus, joka mahdollistaa myös vaihtokuormatiloissa korkeuden säädön. Sen seurauksena on aina käytössä maksimijoustovarot ja jousitus voidaan pitää ihanneasemassa kinematiikan osalta. Ilmajousitus vaatii useita komponentteja toimiakseen, ja tätä voidaan pitää tilankäytön kannalta negatiivisena puolena ilmajousituksessa. Välttämättömiä komponentteja ovat kompressor, joka tuot-

taa tarvittavan paineilman, ja ilmankuivain, joka huolehtii siitä ettei järjestelmään pääse kosteutta. Tarpeellisia ovat myös ilmansuodatin, joka estää roskien pääsyn järjestelmään, ja paineilmalinjat, joiden kautta paineistettu ilma viedään jousille. Lisäksi järjestelmään kuuluu paineilmasäiliö, jossa paineistettua ilmaa saadaan säilytettyä. Säiliö pitää huolen siitä, että järjestelmä on jatkuvasti toimintakykyinen ja kompressorin ei tarvitse jatkuvasti tuottaa paineilmaa.

Jousien ominaisuuksia voidaan tutkia ominaisvärähtelytaajuuden avulla, joka kertoo jousituksen suhteellisen jäykkyyden. Tieliikennekäyttöön tarkoitetuissa henkilöautoissa jousitus on yleensä huomattavasti löysempi kuin kilpakäyttöön tarkoitetuissa. Mitä pienempi ominaisvärähtelytaajuus on, sitä löysempi jousitus on. Jousituksen suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon se, ettei jousittamattoman ja jousitetun massan ominaistajuuudet ole liian lähellä toisiaan. Ominaistajuuksien ollessa liian lähellä toisiaan joustotilanteissa epämiellyttävät värähtelyt siirtyvät jousituksen komponenteista koriin ja sitä kautta ne vaikuttavat kuljettajaan ja matkustajiin.

Etuakselin taajuus voidaan laskea kaavalla 3.

$$\omega_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{ngp_1}{h_1(p_1 - p_0)}} \quad (3)$$

$\omega_1$  on ominaisvärähtelytaajuus [Hz]

$n$  on kerroin, joka on yleensä ilmajousilla 1,4

$g$  on putoamiskiihtyvyys [ $\text{m/s}^2$ ]

$p_1$  on jousessa käytetty paine [bar]

$h_1$  on ilmapatsaan korkeus [m]

$p_0$  on ulkoilman paine [bar]

Projektin tässä vaiheessa ei ollut mahdollista selvittää kaikkia laskemiseen tarvittavia tekijöitä, joten ominaisvärähtelytaajuuden oletettiin olevan noin 1,5 Hz.

Kuten aiemmin mainittiin, jousituksen suunnittelussa on tärkeä ottaa huomioon jousitetun ja jousittamattoman massan taajuus. Jotta jousitetun massan värähtelytaajuus saadaan laskettua, täytyy tietää jousen jousivakio ja renkaan jousivakio. Autossa käytetyn renkaan ominaisuuksia ei saatu selvitettyä, joten käytetään arviota 45 N/mm. Jousen jousivakion laskemiseen tarvitsee tietää liikesuhde. Liikesuhde kertoo kuinka paljon iskunvaimennin liikkuu suhteessa pyörään. Jos liikesuhde on yli yhden, niin iskunvaimennin liikkuu vähemmän kuin pyörä. Liikesuhteen oletettiin olevan noin 0,95, koska kyseessä on McPherson-tuenta.

Liikesuhteen oletetulla arvolla jousen jäykkyys saadaan laskettua kaavalla 4.

$$K_s = 4\pi^2 f_r^2 m_{sm} MR^2 \quad (4)$$

$K_s$  on jousivakio [N/m]

$f_r$  on ominaisvärähtelytaajuus [Hz]

$m_{sm}$  on jousitettu massa

$MR$  on liikesuhde [pyörä/jousi]

Kaavan avulla tulokseksi saadaan 76 N/mm. Kun jousen jäykkyys on saatu laskettua, voidaan laskea joustojäykkyys pyörällä kaavalla 5.

$$K_w = \frac{K_s}{MR^2} \quad (5)$$

Joustojäykkyys pyörällä on 65 N/mm.

Jousittamattoman massan ominaistaajuus saadaan laskettua kaavalla 6. Kaavassa käytettävä renkaan jousivakio on arvio oikeasta arvosta, koska rengasdataa ei ollut mahdollista saada eikä renkaita ollut mahdollista mitata aikataulun takia.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_r + c_j}{m_r}} \quad (6)$$

$f$  on jousittamattoman massan likimääräinen ominaistajuus [Hz]

$c_r$  on renkaan jousivakio [N/m]

$c_j$  on jousen jousivakio [N/m]

$m_r$  on jousittamaton massa

Jousittamattoman massan likimääräiseksi ominaistajuudeksi saadaan kaavan avulla laskettua noin 19 Hz, joka poikkeaa jousitetun massan ominaistajuudesta selkeästi.

Jousiin liittyvät laskut on laskettu arvioiduilla arvoilla, koska oikeita lähtöarvoja ei ollut mahdollista saada kaikkiin laskuihin. Arvioitujen arvojen käytön takia myös lopputulokset ovat vain suuntaa-antavia arvoja. Niiden avulla voidaan kuitenkin tehdä arvio todellisesta tilanteesta.

### 3.5 Suunnittelu

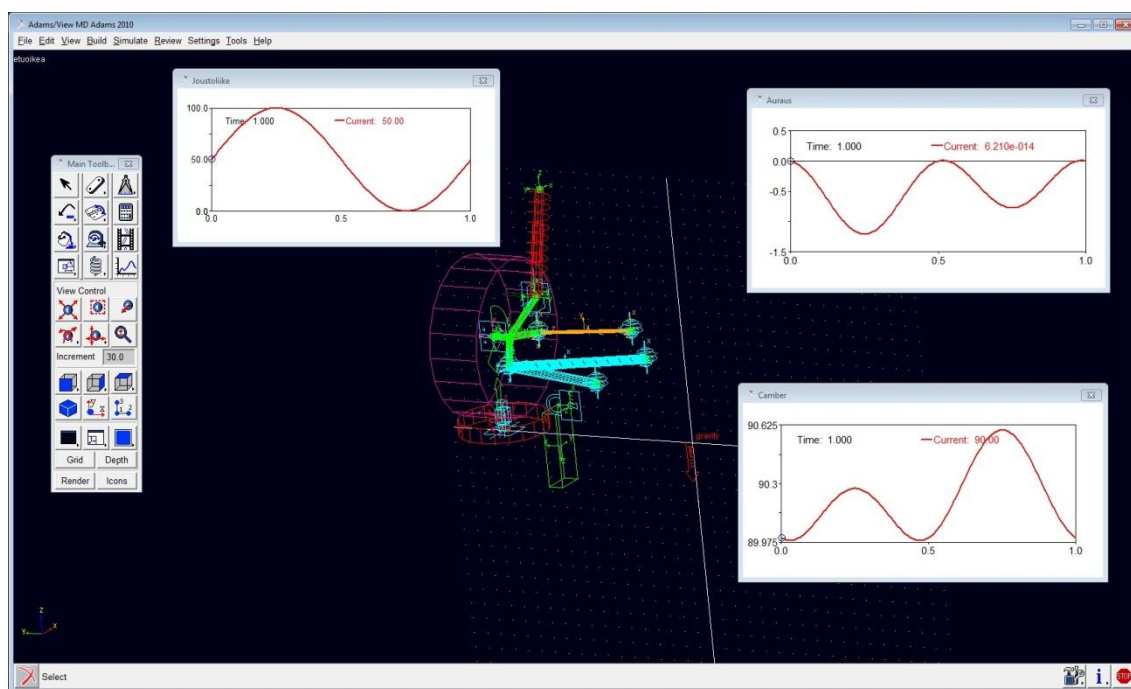
Etutuennan suunnitteluun kuului kolme vaihetta. Ensimmäinen vaihe oli tuennan osien digitoiminen ja mallintaminen sekä jousitusgeometrian mallintaminen kanta-autosta. Ensimmäisen vaiheen jälkeen suunniteltiin mallinnetuilla tuennan osilla tuenta mock upiin. Mock upin valmistuttua siirryttiin kolmanteen ja viimeiseen vaiheeseen, jossa suunniteltiin lopullinen tuenta varsinaiseen autoon. Tuennan suunnittelua rajoittivat valmiiden osien käyttö ja tilan aiheuttamat rajoitukset. Joustogeometriaan voitiin kuitenkin vaikuttaa nivelpisteiden sijainteja muuttamalla. Suunnittelun edetessä huomattiin myös se, että McPhersonin käyttö edellyttää monien kompromissien tekemistä.

#### 3.5.1 Ensimmäinen vaihe

Projektin alettua etsittiin autoon sopiva tuenta- ja ohjaustyyli. Valinnat kohdistuivat McPherson-tuentaan ja hammastanko-ohjaukseen. Valintojen varmistuttua saatiin kuulla, että kanta-autoksi valikoitui Volkswagen Polo. Kanta-auton tärkein valintakriteeri oli moottori. Kanta-autosta saatiin myös otettua komponentit etutuentaan ja ohjaukseen. Ennen kuin auto saatiin ostettua projektille, sitä saatiin lainattua, jotta päästiin ensin tutkimaan tuentaa ja sitten digitoimaan tuennan eri komponentit. Yksittäisiä kom-

ponentteja irrotettiin kanta-autosta ja sen jälkeen ne digitoitiin ja lisäksi suurempia kokonaisuuksia digitoitiin niiden ollessa paikallaan autossa. Tuennan osalta suuremmat kokonaisuudet käsittivät tukivarren, olka-akselin ja iskunvaimennintolpan sijainnit toisiinsa nähden. Sijainnit oli helpoin määrittää ensin digitoimalla osat ja sen jälkeen digitoimalla nivelpisteet eli pisteet, joissa kaksi osaa on toisissaan kiinni ja joiden ympäri osat pyörivät toisiinsa nähden. Digitoinnin jälkeen kaikki osat mallinnettiin mahdollisimman tarkasti, jotta mallinnukset olisivat mahdollisimman lähellä oikeaa tilannetta. Jos mallinnuksiin olisi tullut suuria virheitä, simulointeihin olisi tullut myös paljon virheitä ja se olisi vaikuttanut lopullisen auton jousitusominaisuuksiin.

Mallinnus tehtiin Catia V5R20 -mallinnusohjelmalla ja siitä saadut nivelpisteet siirrettiin Adams/AView-ohjelmaan. Kuviossa 8 on nähtävissä etutuenta mallinnettuna Adams/AView-ohjelmalla. Ensin ohjelmaan tehtiin pisteitä Catiasta saatujen nivelpisteiden kohdille ja sen jälkeen niiden välille luotiin tuennan eri osat. Tuennan osien jälkeen tehtiin lisäksi rengas kanta-auton renkaan mittojen mukaan.



Kuvio 9. Etutuenta mallinnettuna Adams/AView-ohjelmalla.

Digitointien perusteella tehtyä ensimmäistä tuennan mallia ei voitu suoraan alkaa tutkimaan, koska digitoinnin aikana auton renkaat olivat ilmassa ja näin ollen tuenta ei ollut staattisessa tilassa vaan ulosjouston maksimitilanteessa. Muutos täytyi ensin teh-

dä Catiassa ja sen jälkeen Adams/AView:ssä, koska Catiassa pisteiden liikuttelu oli hankalampaa ja Catiaan tehdyn mallinnuksen täytyi olla tarkasti halutun kaltainen. Iskuvaimennintolpan asentoa ei myöskään saatu mallinnettua riittävän tarkasti mittakädellä sen liikkuvuuden rajoitteiden takia ja tolpan sijainti piti laittaa suunnilleen paikalleen. Näiden tekijöiden takia lopullista suunniteltua tuentaa ei voi vertailla Polon tuentaan ja vertailu tehdään asetettuihin tavoitteisiin. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin paljon tuennan suunnitteluun liittyvää kirjallisuutta ja kokeiltiin nivelpisteiden liikuttelun vaikutusta pyöräntulmien muutoksiin. Ohjaukseen ei keskitytty vielä suunnittelun tässä vaiheessa vaikka se vaikuttaakin erittäin olennaisesti joustotilanteissa vaikuttaviin pyöräntulmien muutoksiin. Ensimmäisen vaiheen tavoite oli tutustua käytettäviin ohjelmiin ja opiskella jousitusgeometriaa.

### 3.5.2 Toinen vaihe

Toisen vaiheen tarkoituksena oli suunnitella tuenta mock upiin. Toisen vaiheen suunnittelussa käytettiin samoja ohjelmia kuin ensimmäisessä vaiheessa. Suunnittelu toisessa vaiheessa jatkui siitä, mihin se ensimmäisessä jäi. Tuennan nivelpisteitä lähdettiin siirtelemään ja sitä kautta tarkasteltiin osien sijoittelun vaikutusta jousitusgeometriaan. Lisäksi mallinnettuihin kokoonpanoihin tuotiin mukaan ohjauksen komponentit. Vielä suunnittelun tässäkin vaiheessa ohjaus jätettiin hieman toisarvoiseksi, koska aikataulu oli kiireellinen ja tuennan osat piti saada sijoiteltua jo lähelle niitä paikkoja, missä ne tulisivat olemaan lopullisessa autossa. Ohjausta suunniteltiin sen verran, että hammas-tanko sijoitettiin auton keskilinjalle etuapurungon päälle suunnilleen samalle korkeudelle, missä se oli kanta-autossa. Simuloinnilla tarkastettiin, että aurausmuutokset eivät ole kohtuuttoman suuria joustotilanteissa. Mock upin idean kannalta ohjauksen toimivuus ei ollut tärkein tekijä vaan se, että nähdään kaikkien tuennan ja ohjauksen osien mahtuvan suunnitelluille paikoilleen. Ohjauksen suunnittelussa raidetankojen sijaintien pienetkin muutokset voivat aiheuttaa suuria muutoksia tavoiteltaessa Ackermann-ohjausta ja tutkittaessa aurausmuutoksia joustotilanteissa.

Tuennan suunnittelu painottui tässä vaiheessa tarkastelemaan camber-kulman ja aurauskulman muutoksia ulos- ja sisäänjoustotilanteissa. Camber-muutokset olivat aluksi suuria ja ulos- sekä sisäänjoustotilanteissa positiivisen puolella. Tämä ei ole toivottu ominaisuus joustotilanteissa ajettavuuden kannalta. Sisäänjoustossa on suotuisaa, että

camber-muutos on negatiiviseen suuntaan ja mielellään camber on negatiivinen. Tämä siitä syystä, että mutkaan ajettaessa ulkopuolen rengas joustaa sisään. Ulkopuolen renkaalla on tässä tilanteessa suurin kuorma ja siitä syystä olisi toivottavaa saada mahdollisimman hyvä pito. Camberin ollessa negatiivinen renkaasta saadaan mahdollisimman suuri kosketuspinta tiehen ja sitä kautta enemmän pitoa. Jos camber olisi positiivinen, rengas olisi kallellaan olkansa varassa ja renkaasta ei saataisi parasta mahdollista pitoa. Camber-muutokset saatiin halutun kaltaisiksi muuttamalla staattisen tilanteen camber nolasta puoleen asteeseen negatiivista ja muuttamalla alatukivarren sisäpuolen nivelpisteiden sijainteja. Sekä etu- että takakiinnityspistettä nostettiin noin 12 mm ylemmäs. Näiden muutosten seurauksena camber-muutokset saatiin sisäänjoustossa negatiiviselle ja ulosjoustossa positiiviselle. McPherson-tuennan käyttö rajoittaa suunnittelua camberin osalta, mutta myös helpottaa suunnittelua, koska ei ole kahta tukivartta, joiden asennot pitäisi suunnitella. Kahden tukivarren käyttö mahdollistaisi esimerkiksi sen, että sisäänjoustossa camber-muutos olisi pienempi kuin ulosjoustossa suhteessa renkaan liikkumaan matkaan.

Aurausmuutokset olivat suunnittelun tässä vaiheessa camber-muutosten tavoin erittäin suuria. 50 mm:n sisäänjoustossa haritusta oli melkein 2,5 astetta ja 50 mm:n ulosjoustossa aurausta noin 0,8 astetta. Aurausmuutoksia saatiin pienemmiksi muuttamalla raidetankojen sijoittelua. Raidetankoja oli mahdollista muuttaa tuennan komponentteja enemmän, koska niitä ei otettu suoraan kanta-autosta, vaan ne päätettiin valmistaa itse. Ensimmäiseen ohjauksen mallinnukseen verrattuna raidetankojen sisäpäitä nostettiin, eli hammastankoa nostettiin, ja sen seurauksena haritusta saatiin pienennettyä sisäänjoustossa asteen verran ja ulosjoustossa aurausmuutos pieneni noin 0,2 asteeseen. Ulosjoustossa muutos pieneni, mutta kuvaajan muoto meni huonompaan suuntaan ajoneuvon hallinnan kannalta. Kuvaajasta pystyi näkemään, että ensin muutos oli aurauksen suuntaan, mutta puolella välissä se kääntyikin harituksen suuntaan ja sitten taas aurauksen suuntaan. Tämä voi aiheuttaa ajoneuvon hallinnan menettämisen ja odottamattomia suunnanmuutoksia. Caster-kulma oli suunnittelun tässä vaiheessa 3,16 astetta, joka on normaali arvo tämän kokoluokan henkilöautolle. Kun camber- ja aurausmuutokset oli saatu parempaan suuntaan, lisättiin tuentamalliin mahdollisuus tarkastella renkaiden kääntämisen aiheuttamia muutoksia. Hyvin nopeasti tuli selväksi se, että ohjauksen ja aurausmuutosten välillä joudutaan tekemään kompromisseja. Ohjaukseen ei kuitenkaan ollut aikaa paneutua tässä vaiheessa sen enempää. Ohjauk-



sen suunnittelun tavoitteeksi päätettiin valita linjaus, että yritetään päästä mahdollisimman lähelle Ackermann-ohjausta kaikilla kääntökulmilla kuitenkin aiheuttamatta liian suuria aurasmuutoksia joustotilanteissa.

Seuraavaksi siirryttiin tarkastelemaan muita tuentaan liittyviä tekijöitä. A-mitta katsottiin Catian avulla ja sen arvoksi saatiin -21,9 mm. Tyypillinen arvo staattisessa tilassa a-mitalle on -20–80 mm. Tässä tapauksessa a-mitta oli hieman noiden tyypillisten lukemien ulkopuolella. Negatiivisella a-mitalla saadaan vähennettyä jarrujen puoltamista. Jos a-mitta halutaan lähemmäksi nollaa, se on mahdollista renkaan leveyttä kasvattamalla tai vanteen ET:tä kasvattamalla. Etujättö katsottiin myös Catian avulla ja sen arvoksi saatiin 22,6 mm. Tyypillinen arvo etujätölle autoissa, joissa on ohjaustehostin, on 10–40 mm. Autoissa, joissa ei ole ohjaustehostinta tyypillinen arvo on 0 mm. [1, s. 26.] Positiivisella etujätöllä rengas saadaan kulkemaan hyvin haluttua reittiä, koska siihen kohdistuu itseohjaavia voimia, jotka aiheutuvat renkaan kontaktipinnalla esiintyvistä sivusuuntaisista voimista. SAI-kulma oli tässä vaiheessa suunnittelua 14,1 astetta, joka on tyypillisten arvojen sisällä, mitkä ovat etuvetoisella etumoottorisella autolla 8–16 astetta [1, s. 25]. SAI-kulma määrittää a-mitan ja se vaikuttaa raidetankojen pituuteen ja caster-kulman muutoksiin.

Mallinnetun tuennan ja mock upiin kasatun tuennan välisiä eroja päästiin tarkastelemaan, kun mock up saatiin valmiiksi ja päästiin tarkastamaan pyöränkulmat Hunter-pyöriensuuntauslaitteella. Taulukossa 1 on esitetty pyörien suuntauksesta saadut arvot ajokorkeudessa ja siitä 20 mm:n välein maksimiulos- sekä -sisäänjoustoön. Tutkitut muuttujat olivat camber, caster, SAI ja auraus. Molemmat renkaat käsiteltiin erikseen ja aurauksessa katsottiin vielä kokonaisauraus. Pyörien asentokulmat eri joustotilanteissa saatiin selville muuttamalla auton korkeutta ilmajousituksen avulla ja ottamalla ylös koneen antamia arvoja.

Taulukko 1. Pyörien suuntauksesta saadut arvot mock upin etutuennasta eri joustomatkalla.

	Camber		Caster		SAI		Auraus		
Jousto	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Kok.
Max. ulos	0°34'	0°17'	3°22'	3°40'	13°51'	13°51'			-0°57'
40 mm ulos	0°29'	0°15'	3°22'	3°40'	13°56'	13°54'	-0°19'	-0°33'	-0°53'
20 mm ulos	0°06'	-0°11'	3°22'	3°40'	14°19'	14°19'	-0°08'	-0°16'	-0°25'
Ajokorkeus	-0°16'	-0°39'	3°22'	3°40'	14°42'	14°47'	0°05'	0°05'	0°10'
20 mm sisään	-0°31'	-0°59'	3°22'	3°40'	14°57'	15°07'	0°17'	0°22'	0°39'
40 mm sisään	-0°45'	-1°22'	3°22'	3°40'	15°10'	15°30'			1°20'

Mock upin tuennan vertailukohdaksi otettiin mallinnettu tuenta, jonka mukaan tuenta kasattiin mock upiin. Taulukossa 2 on esitetty Adams/AView'stä saadut arvot ajokorkeudessa ja siitä 20 mm:n välein maksimiulos- sekä -sisäänjoustoon. Tutkitut muuttajat ovat samat kuin ylemmässä taulukossa.

Taulukko 2. Adams/AView'stä saadut arvot mock upin etutuennasta eri joustomatkalla.

	Camber		Caster		SAI		Auraus		
Jousto	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Vasen	Oikea	Kok.
Max. ulos	1°44'	1°44'	2°55'	2°55'	14°08'	14°08'	-0°30'	-0°30'	-0°61'
40 mm ulos	1°05,9'	1°05,9'	2°58'	2°58'	14°08'	14°08'	-0°18'	-0°18'	-0°37'
20 mm ulos	0°06,6'	0°06,6'	3°03'	3°03'	14°08'	14°08'	-0°03'	-0°03'	-0°07'
Ajokorkeus	-0°30'	-0°30'	3°16'	3°16'	14°08'	14°08'	0°	0°	0°
20 mm sisään	-0°44'	-0°44'	3°16'	3°16'	14°08'	14°08'	-0°08'	-0°08'	-0°16'
40 mm sisään	-0°36'	-0°36'	3°22'	3°22'	14°08'	14°08'	-0°28'	-0°28'	-0°56'

Taulukoiden tarkastelusta on mahdollista tehdä muutamia havaintoja. Camberin osalta suuntauksessa muutokset ovat joustoissa huomattavasti pienempiä, varsinkin ulosjoustossa. Muutos menee sekä simuloinnissa että suuntauksesta saaduissa tuloksissa haluttuun suuntaan eli sisäänjoustossa negatiivista camberia ja ulosjoustossa positiivista. Caster-kulma ei muutu suuntauksessa ollenkaan. Suuntauksessa on havaittavissa pieni ero casterissa vasemman ja oikean puolen välillä. Tämä ero johtuu todennäköisesti joko asennusvirheestä tai mock upin rungossa olevista eroista. Simuloinnissa caster muuttuu noin puoli astetta suunnilleen 100 mm:n joustomatkalla, mikä on hyväksyttävä muutos. SAI-kulma muuttuu suuntauksessa reilun asteen verran 100 mm:n joustomatkalla. SAI-kulmassakin on pieni ero vasemman ja oikean puolen välillä, mikä johtuu

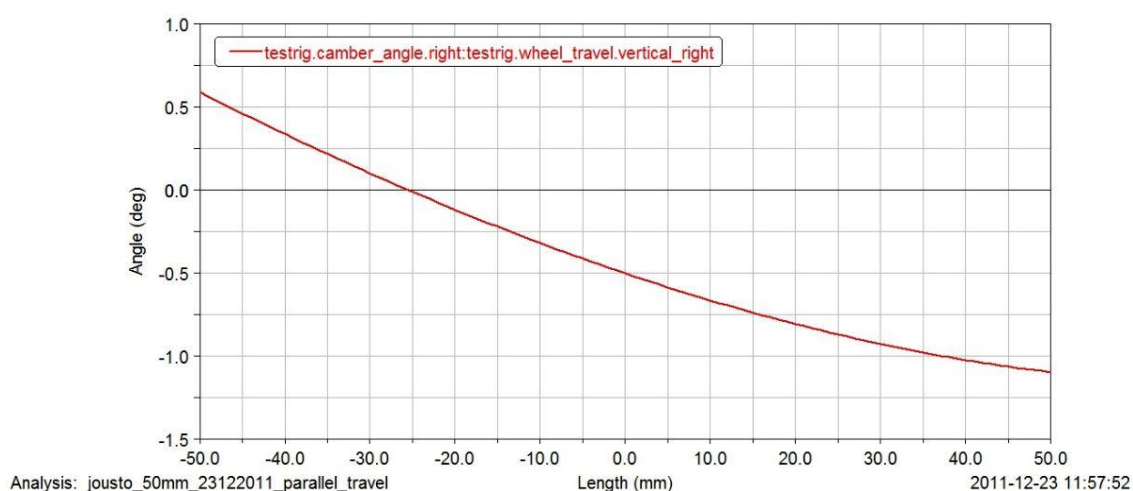
samoista syistä kuin erot casterissakin. Simuloinnissa SAI-kulma ei muutu ollenkaan, mikä saattaa johtua siitä, että iskunvaimentimen yläpään nivel oli väärin valittu. Aurauskulmissa on eroa simuloinnin ja suuntauksesta saatujen tulosten välillä. Nämä erot johtuvat siitä, että hammastanko ja raidetangot mock upin tapauksessa laitettiin paikalleen ilman tarkempia mittauksia ja simuloinnissa ne ovat selvästi eri paikassa. Yksi syy siihen, että eri muuttujien välillä on eroja simuloinnissa ja suuntauksessa saaduissa tuloksissa on se, että simuloinnissa kaikki nivelet ovat jäykkiä eivätkä ne anna ollenkaan periksi. Oikeassa tilanteessa nivelien kumipuslat joustavat ja ne vaikuttavat tapahtuviin muutoksiin. Kumipuslien tutkimiselle ja jäykkyyden määrittämiselle ei ollut mahdollisuutta tämän opinnäytetyön puitteissa.

### 3.5.3 Kolmas vaihe

Kolmatta vaihetta lähdettiin jatkamaan siitä mihin toinen vaihe jäi. Edelleen haluttiin parantaa pyöränkulmien muutoksia ja lisäksi nyt päästiin rauhassa keskittymään myös ohjauksen suunnitteluun. Suunnittelun aikana kaikkia muutoksia ei tallennettu uusiin omiin versioihin vaan yleensä tallennus tehtiin vanhan version päälle. Tästä johtuen keskitytään vertailemaan muutoksia ja tuloksia mock upiin sekä asetettuihin tavoitearvoihin. Tuennan osalta tavoite oli saavuttaa mahdollisimman pienet muutokset joustotilanteissa ja ohjauksen tavoite oli päästä mahdollisimman lähelle ihanteellista Ackermann-ohjausta kaikilla renkaiden kääntökulmilla. Kolmannen vaiheen aikana ei ollut tiedossa kumipuslien ominaisuudet, joten eroa suunnittelun ja varsinaisen autoon rakennettavan tuennan välillä voi olla siitäkin johtuen. Suunnitteluohjelma vaihtui Adams/AView'stä Adams/Cariin. Ohjelmaa vaihdettiin, koska uusi ohjelma oli autojen suunnittelussa huomattavasti kattavampi ja siihen suunniteltu, ohjelma sisälsi valmiit mallipohjat eikä mallia tarvinnut tehdä itse, vain nivelpisteiden sijainnit (liite 2) piti antaa ja ohjelma osasi rakentaa siitä tuennan 3D-mallin. Kokoonpanon simulointi ja simulointien tulosten tarkastelu oli huomattavasti helpompaa ja nopeampaa. Simulointi valittiin listasta, sen jälkeen syötettiin haluttu joustomatka ja ohjauskulma. Eri muuttujien arvojen tarkastelu oli helppoa, ja tuloksia pystyi tarkastelemaan esimerkiksi joko ajan, joustomatkan tai renkaan kääntökulman mukaan.

Camber-kulman osalta tavoitteeksi asetettiin ennen suunnittelun alkua 0,3–0,5 astetta muutosta 10 mm:n joustomatkalla. Lopullisessa kokoonpanossa camber muuttuu 10

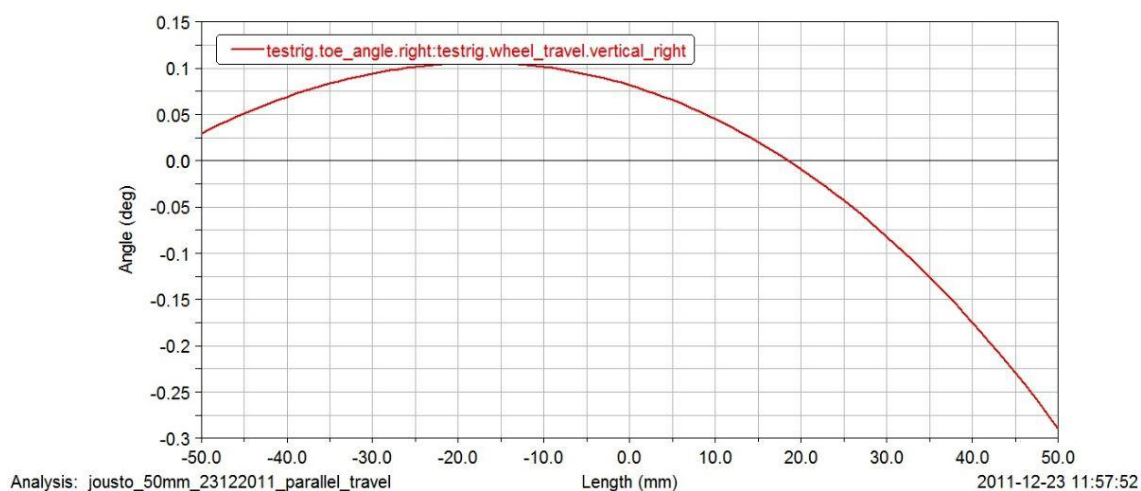
mm:n joustomatkalla 0,18 astetta. Camber-kulman suhteen muutoksen haluttiin olevan sisäänjoustossa negatiivista ja ulosjoustossa positiivista. Tämä sen takia, että etuakselin sortokulmat saadaan pienemmiksi ja näin ollen aliohjautuvuutta saadaan vähennettyä etuvetoisella ja etupainoisella autolla. Muutoksen ollessa positiivinen auton kaarreoimaisuudet muuttuisivat aliohjautuvaan suuntaan. Positiivisella kallistumalla tarvittavan kaarresivuttaisvoiman kehittämiseksi tarvitaan suurempi sortokulma kuin pyörän ollessa pystyssä tai sisäänpäin kallistuneena. Kuviossa 9 on esitetty oikean renkaan camber-muutos joustomatkan suhteen. Kuvaaajassa käyrän vaaka-akselin negatiivinen puoli kuvaa ulosjoustoa ja positiivinen sisäänjoustoa.



Kuvio 10. Oikean eturenkaan camber-muutos joustomatkan suhteen.

Aurauksen suhteen autosta oli tarkoitus tehdä mahdollisimman stabiili. Joustotilanteessa etuakselilla haluttiin olevan haritusta. Aurausmuutokset pyrittiin saamaan mahdollisimman pieniksi, jotta aurauksen vaikutus ajettavuuteen olisi mahdollisimman pieni joustotilanteessa. Aurausmuutos yhdellä renkaalla 100 mm:n joustomatkalla on 0,4 astetta. Mock upiin verrattuna aurausmuutos on pudonnut noin puoleen. Mock upissa sisään- ja ulosjoustossa oli molemmissa aurausta, joka ei ollut tavoiteltua. Viimeisessä tuennan versiossa sisäänjoustossa on haritusta ja ulosjoustossa aurausta. Staattisessa tilassa on aurausta 10 minuutin verran, koska sillä saadaan kompensoitua vetävän akselin vetovoiman aiheuttama haritusmomentti, jonka momenttivartena toimii negatiivinen a-mitta. Haittapuolena staattiselle auraukselle on se, että a-mitan ollessa negatiivinen ilman vetoa vierinvastus kasvattaa aurausmomenttia ja aurausta saattaa tulla hie- man lisää. Tällä ei kuitenkaan ole erityisen suurta vaikutusta, koska autolla kuitenkin ajetaan suurimmaksi osaksi, varsinkin kaupunkiolosuhteissa, veto päällä. Aurauskulmis-

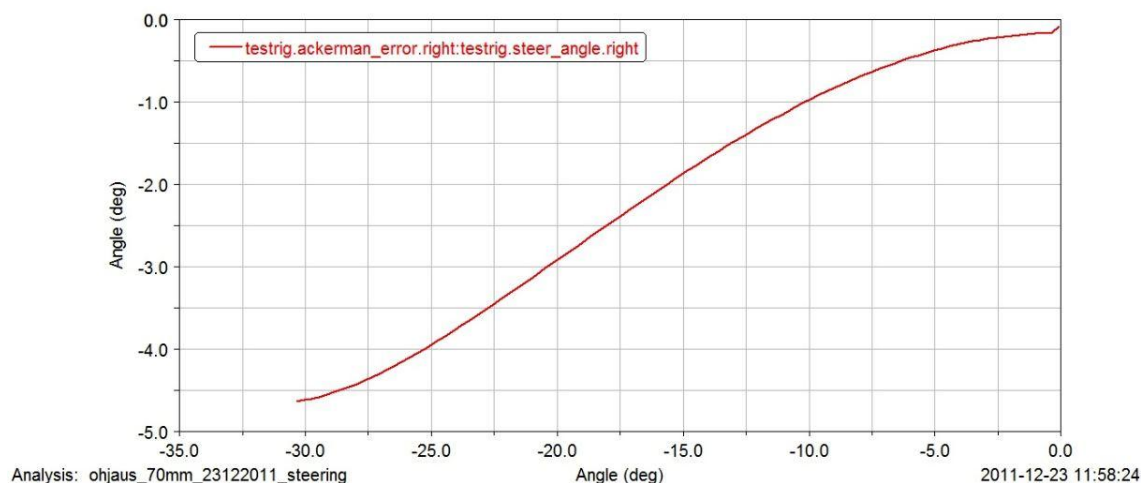
sa tapahtuviin muutoksiin pystyttiin vaikuttamaan eniten muuttamalla raidetankojen pituuksia ja sisäpäiden kiinnitysten sijainteja. Liian lyhyt raidetanko aiheuttaa sisään- ja ulosjoustossa aurauksen pienenemistä, liian pitkä lisääurausta. Sisäpään kiinnityspisteessä ollessa liian alhaalla sisäänjoustossa aurauskulma pienenee ja liian ylhäällä sisäänjoustossa lisääurausta. Kuviossa 10 on esitetty oikean puolen renkaan aurausmuutos joustomatkan suhteen. Kuten aiemmassakin kuvaajassa vaaka-akselin negatiivinen puoli kuvaa ulosjoustoa ja positiivinen sisäänjoustoa. Pystyakselin positiivisella puolella on aurausta ja negatiivisella haritusta.



Kuvio 11. Oikean eturenkaan aurausmuutos joustomatkan suhteen.

Caster-kulman suhteen tavoitteena oli alun perin 0,3 asteen muutos 10 mm:n joustomatkalla. Lopullisen mallin simulointien perusteella caster-kulman muutos on 0,08 astetta 10 mm:n joustomatkalla. Caster-kulman suhteen päästiin siis myös asetettuun tavoitteeseen. Caster-kulma itsessään on pidetty lähellä samaa suunnittelun alusta alkaen. Viimeisessä versiossa staattisessa tilassa kulma on 3,25 astetta, joka on hyvin tyypillinen tämän kokoluokan autoille. Kallistuskeskiön korkeuden tavoitteeksi asetettiin 30 – 100 mm maanpinnan tasolta. WinGeo3-ohjelman avulla selvitetty kallistuskeskiön korkeus on viimeisessä versiossa 98,8 mm staattisessa tilassa. SAI-kulman tyypillinen arvo etuvetoisille etumootorisille henkilöautoille on 8–16 astetta, WinGeo3:n mukaan SAI-kulma on 14,8 astetta. A-mitta kasvoi hieman mock upin arvoon verrattuna. A-mitta WinGeo3:n mukaan on -26,2 mm, joka poikkeaa asetetusta välistä 6,2 mm. Noin pieni ero on kuitenkin korjattavissa helposti leveämmällä renkaalla tai vanteen ET:n muutoksella. Etujätön arvoksi saatiin 22,6 mm, joka on tavoitellun 10–40 mm:n välissä.

Kolmannessa vaiheessa ohjausta päästiin tutkimaan ja suunnittelemaan tarkemmin kiireettömän aikataulun ansiosta. Tavoitteena ohjaukselle oli päästä mahdollisimman lähelle Ackermann-ohjausta kaikilla kääntökulmilla. Tätä hankaloitti se, että aina kun ohjaus saatiin lähemmäs tavoitetta, niin aerausmuutokset kasvoivat liian suuriksi joustotilanteissa. Tämän takia raidetankojen ja hammastangon sijoittelu oli kompromissi näiden kahden tavoitteen välillä. Aluksi ohjauksen suunnittelussa oli paljon vapauksia, koska tarkoitus oli ensin suunnitella ja sitten etsiä osat. Suunnittelun päätteeksi huomattiin, että kanta-auton hammastanko on lähes suunnitellun mittainen ja se päätettiin käyttää hyödyksi. Ohjauksen ollessa valmis kuitenkin huomattiin, että polkimet oli sijoitettu niin, että rattiakseli otti niihin kiinni. Tämän takia hammastankoa jouduttiin siirtämään vasemmalle ja jatkamaan toisesta päästä, mutta tästä ei aiheutunut suuria muutoksia aerausmuutoksiin tai ohjausgeometriaan. Ohjausta tutkittiin Ackermann-virheen avulla. Ackermann-virhe Adams/Carissa kertoo vasemmalle kääntyäessä, kuinka paljon liikaa tai liian vähän oikeaa rengasta on käännetty, jotta saavutettaisiin täydellinen Ackermann-ohjaus. Kuviossa 11 on esitetty oikean renkaan Ackermann-virhe vasemmalle kääntyäessä. Kuvioista on nähtävissä se, että oikean renkaan kääntökulman pitäisi olla suurempi, jotta saavutettaisiin haluttu tavoite.



Kuvio 12. Oikean eturenkaan Ackermann-virhe suhteessa vasemman renkaan kääntökulmaan.

Täydelliseen Ackermann-ohjaukseen ei päästy kahdesta syystä. Ensimmäinen syy oli se, ettei haluttu aerausmuutosten kasvavan liian suuriksi joustotilanteissa ja toinen syy oli tila. Hammastangon taaksepäin siirtämisellä olisi ohjaus saatu lähemmäs tavoitetta, mutta tilaa rajoittavat tulipelti ja polkimet. Edellisestä kuvioista on nähtävissä, että virhe kasvaa kääntökulmien kasvaessa. Tämän seurauksena sortokulmat kasvavat ja renkai-

den kuluminen kiihtyy. On kuitenkin huomioitava, että suuria kääntökulmia käytetään vain pienissä nopeuksissa, suurilla nopeuksilla kääntökulmat ovat pienempiä ja silloin virhekin on pienempi. Suurilla nopeuksilla tosin sortokulmat ovat suurempia kuin pienillä nopeuksilla.

Suunniteltaessa kaupunkiautoa on hyvä ottaa huomioon myös kääntösäde. Kaupunkiolosuhteissa tehdään paljon tiukkoja käännöksiä ja välillä on tarpeellista kääntyä mahdollisimman pienessä tilassa. Kääntösädettä tarkasteltiin ohjauksen suunnittelun eri vaiheissa komponenttien sijoittelun muututtua. Kääntösäteen vertailu voidaan tehdä Polon kääntösäteeseen, jonka lukemaksi Volkswagen ilmoittaa noin 5,3 metriä. Kaupunkiautolle kääntösäde laskettiin ulomman pyörän kääntökulman avulla.

Kääntösäde saadaan laskettua kaavalla 7.

$$R = \frac{-\tan\alpha T - 2WB}{2\tan\alpha} \quad (7)$$

$R$  on kääntösäde

$\alpha$  on ulomman renkaan kääntökulma

$T$  on raideväli

$WB$  on akseliväli

Auton akselivälin ollessa 2,47 m, raidevälin ollessa 1,55 m ja ulomman renkaan kääntökulman ollessa 30 astetta kääntösäteeksi saadaan 3,5 m. Kääntösäteeseen vaikuttaa vielä kuitenkin lisäksi sisemmän renkaan kääntösäde. Sisemmän renkaan kääntösäteen laskemiseen käytetty kaava on muuten sama, mutta osoittajassa kulman ja akselivälin etumerkit vain muuttuvat. Sisemmän renkaan kääntösäteeksi saadaan 4,05 m kääntökulman ollessa 37 astetta. Näiden kääntösäteiden keskiarvoksi saadaan 3,775 m, joka on selvästi vähemmän kuin Polon ilmoitettu kääntösäde. Kääntösäteen voidaan näiden laskujen perusteella olettaa riittävän kaupunkiautolle.

## 4 Yhteenveto

Etutuenta ja ohjaus saatiin suunniteltua valmiiksi aikataulun sisällä. Suunnittelutyön valmistumiselle oli asetettu takaraja, koska alustan osien hankkimiseen tarkoitettu budjetti piti käyttää tiettyyn aikarajaan mennessä. Suunnittelun alussa asetetut tavoitteet saavutettiin hyvin. Tuennan osalta oli tarkoitus, että pyörillä tapahtuvat kulmanmuutokset jäivät pieniksi sisään- ja ulosjoustotilanteissa. A-mittaa lukuun ottamatta kaikki tarkastellut muuttujat pysyivät haluttujen raja-arvojen sisällä. A-mitta poikkesi halutusta välistä 6,2 mm, mutta tämä virhe on korjattavissa renkaan leveyttä muuttamalla tai vanteen ET:tä kasvattamalla. Lisäksi a-mittaa voidaan vaikuttaa etuiskunvaimentimien säädettävien yläpäiden avulla. Iskunvaimentimen yläpäästä liikutettaessa on kuitenkin otettava huomioon se, että kun a-mittaa muutetaan, myös SAI-kulma ja camber-kulma muuttuvat. Jos a-mitta liikkuu positiiviseen suuntaan, niin SAI-kulma liikkuu negatiiviseen suuntaan ja camber-kulma liikkuu positiiviseen suuntaan. On mietittävä tarkasti ennen säätämistä, että auton ajo-ominaisuudet eivät mene huonompaan suuntaan säädön seurauksena. Pyöräntulmien muutokset olivat myös kaikissa tapauksissa oikeaan suuntaan tapahtuvia; esimerkiksi camber-kulma muuttui sisäänjoustossa negatiiviseen suuntaan ja ulosjoustossa positiiviseen suuntaan.

Ohjauksen osalta tavoitteet saavutettiin myös hyvin. Kääntösäteen osalta päästiin alle kanta-auton kääntösäteen. Likimääräisten laskujen perusteella kääntösäde jäi alle neljään metriin, mikä on hyvä arvo tämän kokoluokan autolle. Ackermann-virheen osalta ohjaus oli myös hyvin lähellä sitä, mitä yritettiin tavoitella. Suurin ero verrattuna täydelliseen Ackermann-ohjaukseen oli noin 4,6 astetta suurimmilla kääntökulmilla, mitä voidaan pitää siedettävänä erona. Iskunvaimentimen yläpäästä liikutettaessa on otettava huomioon myös ohjaus. Jos yläpäästä liikutetaan auton sivusuunnassa, raidetangot aiheuttavat sen, että staattinen auraus muuttuu.

Etutuennan ja ohjauksen kannalta olisi ollut mielekästä päästä tekemään käytännön testejä, mutta ne eivät olleet mahdollisia projektin tässä vaiheessa. Käytännön testien avulla olisi päästy vertailemaan eroja tietokoneella simuloidun ja oikean ajotilanteen välillä. Simuloinneissa voi olla jonkin verran eroja oikeaan ajotilanteeseen verrattuna, koska simuloinneissa ei käytetty tarkkoja arvoja kumipuslille tai renkaille. Ne vaikuttavat pyöräntulmissa tapahtuviin muutoksiin dynaamisissa kuormituksissa.



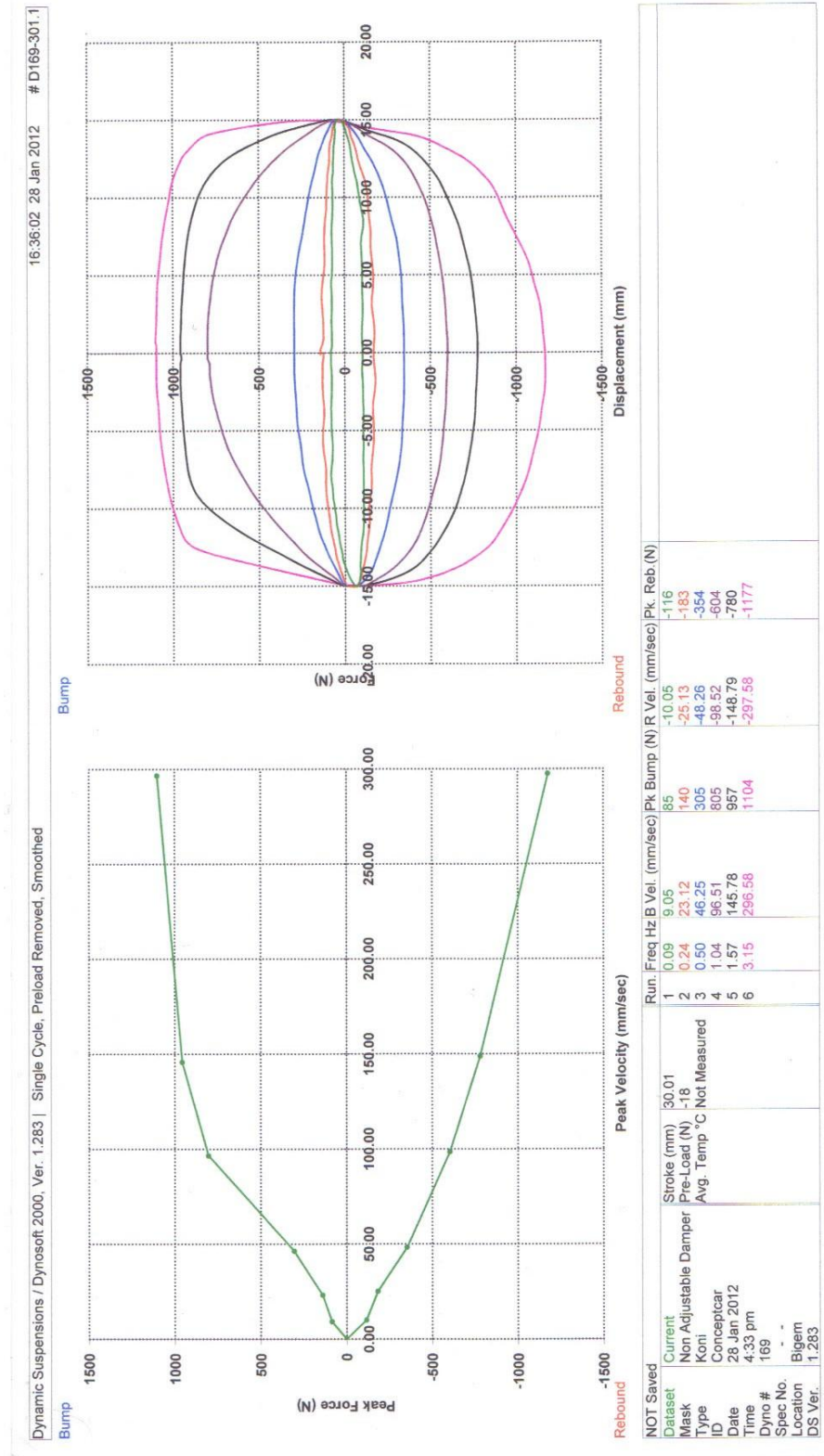
Etutuennan ja ohjauksen suunnittelua voi jatkaa tämän työn pohjalta eteenpäin. Osaksi etutuentaa on mahdollista suunnitella kallistuksenvakaaja, kun auton tarkemmat tiedot, kuten paino, ovat selvillä. Kallistuksenvakaaja tulisi toimimaan pitkittäisenä tukivartena tuennalle. Kallistuksenvakaajan avulla korin kallistelua voidaan hillitä ajettaessa kaarteissa. Lisäksi tarkempien tietojen ollessa selvillä auton jousille voi laskea tarkat arvot. Tässä työssä jousilaskut jouduttiin tekemään arvioitujen arvojen perusteella.

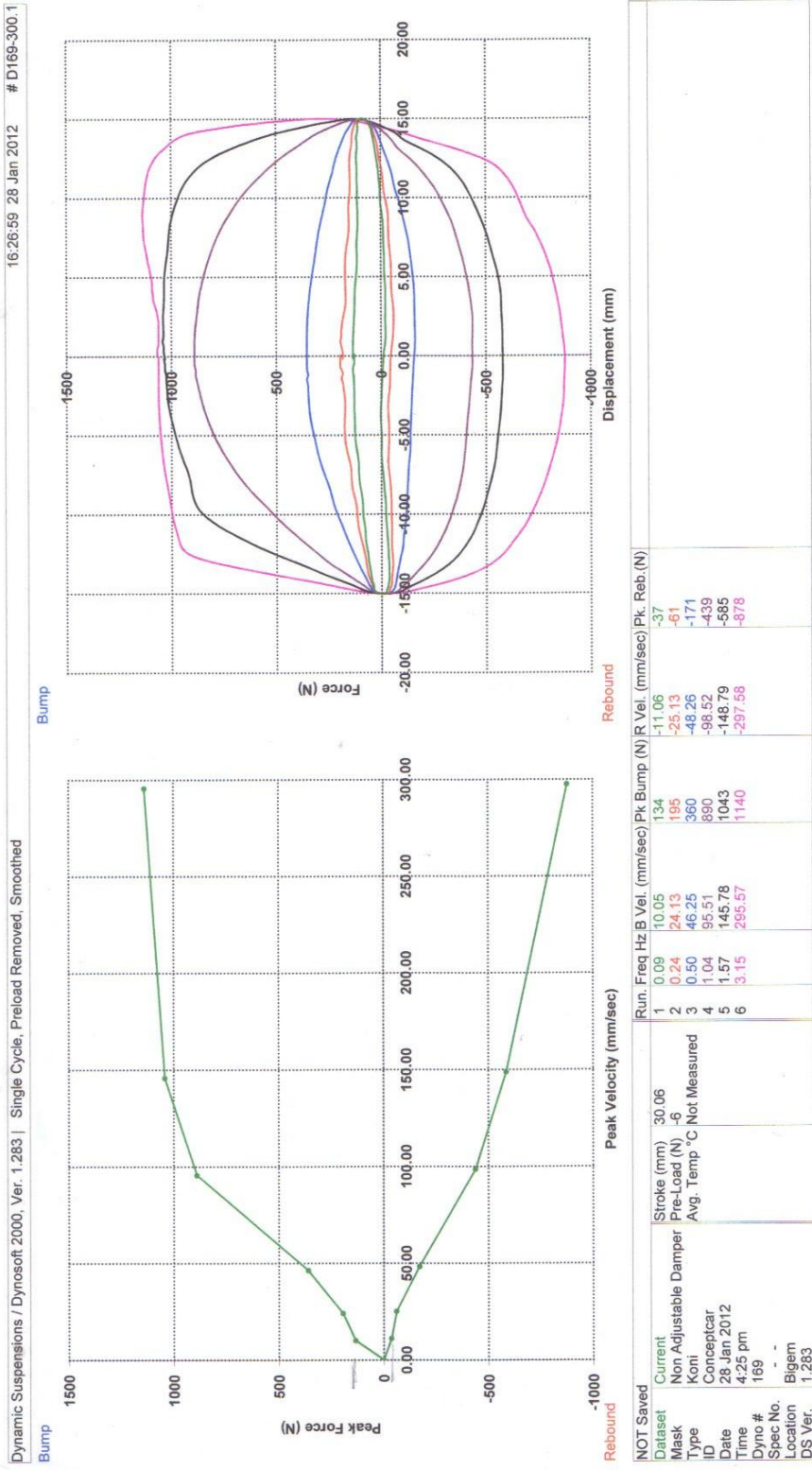
## Lähteet

- 1 Heiing, Bernd & Ersoy, Metin. 2011. Chassis Handbook Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. Berlin: MercedesDuck.
- 2 Laine, Olavi. 1985. Autotekniikka 1. osa Ajo-ominaisuudet. Helsinki: Autoalan Koulutuskeskus.
- 3 Milliken William F. & Milliken Douglas L. 1995. Race Car Vehicle Dynamics. Warrandale, PA: Society of Automotive Engineers.
- 4 Dixon John C. 1999. The Shock Absorber Handbook. Warrandale, PA: Society of Automotive Engineers.

Iskunvaimenninmittausten tulokset

Liite 1  
1 (2)





FRONT REBOUND ADJ. SOFT

## Nivelpisteiden sijainnit

Hardpoint Modification Table

Assembly Subsystem kaupunkiauto\_tuenta\_08122011.etutuenta\_08122011 Name Filter: \*

	loc_x	loc_y	loc_z	remarks
hpl_drive_shaft_inr	0.0	-200.0	225.0	(none)
hpl_lca_front	-9.685	-368.23	217.542	(none)
hpl_lca_outer	-11.64	-749.813	193.841	(none)
hpl_lca_rear	266.222	-399.936	220.504	(none)
hpl_spring_lwr_seat	3.43	-647.645	358.285	(none)
hpl_strut_lwr_mount	3.43	-647.645	358.285	(none)
hpl_subframe_front	-400.0	-450.0	150.0	(none)
hpl_subframe_rear	400.0	-450.0	150.0	(none)
hpl_tierod_inner	200.0	-370.0	301.05	(none)
hpl_tierod_outer	123.15	-718.576	291.289	(none)
hpl_top_mount	20.768	-598.401	765.156	(none)
hpl_wheel_center	0.0	-813.0	301.05	(none)

Display: Single and Left Right Both OK Apply Cancel

Hardpoint Modification Table

Assembly Subsystem kaupunkiauto\_tuenta\_08122011.ohjaus\_08122011 Name Filter: \*

	loc_x	loc_y	loc_z	remarks
hpl_rack_house_mount	200.0	-320.0	301.05	(none)
hpl_tierod_inner	200.0	-370.0	301.05	(none)
hps_intermediate_shaft_forward	400.0	-300.0	500.0	(none)
hps_intermediate_shaft_rearward	550.0	-300.0	600.0	(none)
hps_pinion_pivot	200.0	-280.0	301.05	(none)
hps_steering_wheel_center	900.0	-300.0	700.0	(none)

Display: Single and Left Right Both OK Apply Cancel